

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 11 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540308

研究課題名（和文） ガスセル・レーザー分光によるタングステン不安定核の核半径の研究

研究課題名（英文） Research on nuclear radii of unstable tungsten nuclei by gas cell laser spectroscopy

研究代表者

飯村 秀紀 (IIMURA HIDEKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・研究主幹

研究者番号：10343906

研究成果の概要（和文）：タングステン同位体の原子スペクトルを精密に測定することにより、これらの原子核の変形を知ることができる。そこで、加速器で生成されたこれらの同位体をガスセル中で捕獲し、それにレーザーを照射してオンラインで測定する手法を開発した。その結果、タングステンの安定同位体の原子スペクトルを測定することには成功したが、極微量な不安定同位体を測定するには、さらなる感度の改善が必要であることが分かった。

研究成果の概要（英文）：By measuring the atomic spectra of tungsten isotopes precisely, information on the deformation of these nuclei can be obtained. For this measurement, we have developed an on-line method, in which the isotopes being produced by an accelerator are captured in a gas cell and are subsequently irradiated by laser. With this method, we have succeeded in measuring the atomic spectra of stable tungsten isotopes, but it has been found that further improvements of the sensitivity are needed for the measurements of unstable isotopes.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核（実験）

1. 研究開始当初の背景

W(Z=74)やOs(Z=76)の質量数180近傍の不安定核では、原子核の非軸対称変形が理論的に予測されており、そのような変形が中性子数の変化とともにどのように現れるか、核構造論上非常に興味を持たれている。これらの核種は γ 線分光の手法により調べられつつ

あるが、原子核の基底状態の変形を明らかにする上で決定的な情報はレーザー分光により得られる。すなわち、原子スペクトルの同位体シフトや超微細構造を、レーザーを用いて精密に測定することにより、原子核の荷電半径の同位体間での変化や電磁気モーメント、スピンなど、原子核の変形を直接反映す

る物理量が得られる。このうち特に核荷電半径は、他の実験手法では得られない物理量である。

不安定核のレーザー分光は CERN-ISOLDE (スイス)、ユバスキラ大学 (フィンランド) などで行われているが、W 領域では安定核しか測定されていない。理由は、高精度のレーザー分光のためには試料を原子化する必要があるが、W や Os は高融点元素であり、原子化するのが困難だからである。W 領域の不安定核のレーザー分光が可能となれば、これらの原子核の荷電半径が初めて決定される。それによって、W 領域で原子核の非軸対称変形がどのように現れているのかを知ることができ、それを最新の核構造モデルによる理論予測と比較することで、これらのモデルを詳細に検証することが可能となる。

2. 研究の目的

本研究の目標は、加速器で生成された W の不安定核をレーザー分光する手法を新たに開発し、それによって W 不安定核間での核半径の変化量を決定することである。そこで、加速器からの重イオンビームで生成され、ターゲットから飛び出した W 不安定核をガス中で捕獲し、原子状態のままレーザー分光する手法を試みる。ここで問題となるのは、ガス中でのレーザー分光であるので、共鳴線のドップラー広がりにより、同位体シフトを測定するのに十分な分解能が得られない可能性があることである。さらに、より大きな課題は、加速器で生成される W 不安定核は毎秒 10^4 – 10^5 個程度と考えられるので、いかに高い検出感度を実現し、少ない原子を観測するかということである。

3. 研究の方法

(1) ガス中でのレーザー分光で、同位体シフトを分離できる分解能が得られるかどうかを確認することを行う。これは、レーザーアブレーション分光装置を用いて、安定同位体の試料をガス中でレーザーアブレーションして原子化することにより行う。試料には、分光学的特性がよく分かっている希土類元素をもちいる。図 1 に実験装置の概略を示す。アブレーションには Nd:YAG レーザーのパルス光を用いた。YAG レーザーのビームはレンズで試料表面に集光した。アブレーションは約 500hPa の Ar ガス雰囲気で行った。アブレーションで試料から蒸発しガス中に停まっている希土類原子に、波長可変レーザーを照射し、レーザーの波長を走査しながら共鳴蛍光を観測した。共鳴蛍光は、レンズで集光して分光器を通し、光電子増倍管で計数した。その際、プルーム発光の影響を受けないように、信号に時間ゲートをかけた。また、蛍光以外に、波長可変レーザーの吸収も観測した。

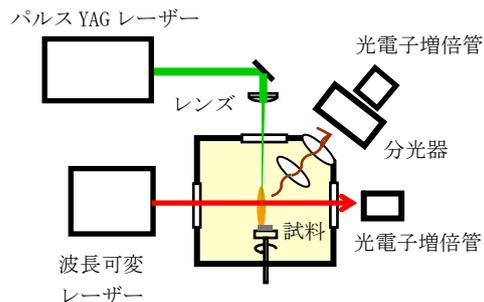


図1 アブレーション分光装置。チャンバー内にはArガスが入る。

(2) 原子力機構のタンデム加速器に設置したガスセル分光装置の概念図を図 2 に示す。セルは Ni 箔のウィンドーで加速器のイオンビームラインの真空と分離されている。セルには高純度の Ar ガスが入る。加速器からの重イオンビームはターゲットを照射して、ストッパーで止まる。ターゲットから反跳で飛び出した核反応生成物は、ガスセル中で減速され、セルの中心付近で止まる。これにレーザーを照射し、共鳴蛍光をレンズで集光して光電子増倍管で観測する。

検出感度を試験する実験では、タンデム加速器のイオンビームとして W の安定同位体を用い、ターゲットやストッパーを除いて、W 安定同位体イオンを直接ガスセル中に打ち込む。イオンビームの加速エネルギーは、核反応で生成される W 不安定核を模擬するように設定した。ガス圧は、ガスセルの中心付近で W 原子が止まるように 10~20hPa に設定した。

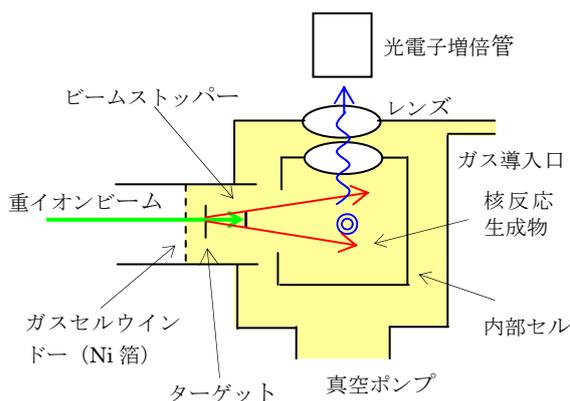


図2 タンデム加速器に設置されたオンライン・ガスセル分光装置の概念図。レーザービームは◎の点を紙面に垂直に通過する。

4. 研究成果

(1) 図 1 で、波長可変レーザーとして XeCl

エキシマレーザー励起の色素レーザー（パルス発振、レーザー線幅 1.2GHz）を用いたところ、共鳴幅は約 10GHz であった。同位体シフトは数 GHz 以下と予想されるので、分離できなかった。そこで、パルスレーザーに替えて、連続発振の固体レーザーで励起したリング色素レーザーを用いた。このレーザーの線幅は約 1MHz である。これを用いて Ce 原子の 594.1nm 遷移 ($3764\text{cm}^{-1} \rightarrow 20592\text{cm}^{-1}$) の蛍光スペクトルを測定した。Ce の主な安定同位体は、 ^{140}Ce と ^{142}Ce である。これらは、原子核のスピンの 0 であるので超微細構造は無い。測定の結果、図 2 に示すように同位体シフトが観測された。ガウス関数でフィッティングして、共鳴幅をおよそ 1GHz と評価した。これは、パルスレーザーでの分解能に比べて一桁以上の改善である。これによって、波長可変レーザーとして連続発振のリング色素レーザーを用いれば、ガス中であっても同位体シフトを測定可能であることが実証された。

なお、波長可変レーザーとして、連続発振の半導体レーザーを用いた実験も行った。結果は、吸収スペクトルで同位体シフトが測定され、共鳴幅は約 0.85GHz であった。ただし、半導体レーザーの出力は約 1mW で、リング色素レーザーの約 100mW に比べて小さいので、蛍光スペクトルは観測できなかった。

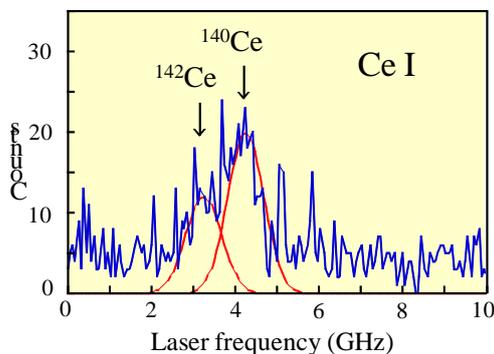


図3 アブレーション分光装置で測定したCeの 594.1 nm遷移の蛍光スペクトル

(2) 図 2 のガスセル装置の検出感度を試験する実験を行った。タンデム加速器のイオンビームをガスセルに入射したところ、イオンビームとガスとの衝突によるバックグラウンド光が、蛍光観測の大きな妨害となることが分かった。これを抑えるために、新たにイオンビームデフレクタを製作し、これを用いてイオンビームをパルス化することを試みた。その結果、イオンビーム OFF 時に蛍光を観測することで、バックグラウンドが大幅に低減できることが分かった。

安定同位体の ^{184}W のイオンビームをパルス化してガスセルに入射し、レーザー（線幅約

2GHz）の波長を段階的に変化させながら蛍光を観測した。その結果、図 4 のように、 ^{184}W の 551.6nm 遷移 ($3326\text{cm}^{-1} \rightarrow 21454\text{cm}^{-1}$) の共鳴を確認することに成功した。安定同位体ではあるが、加速された W 原子のレーザー誘起共鳴蛍光をガスセル中で観測したのは世界で初めてである。

しかし、極微量しか生成されない不安定核を測定するには、現状では感度が不十分であることも判明した。図 4 のスペクトルでは、ガスセルに入射した W 原子数は毎秒 10^9 個程度である。それに対して、実際に核反応で生成される不安定核数は 10^6 個程度と予想される。感度を改善するには、レーザーの散乱光を落とす必要がある。これを行う段階で東日本大震災が起これ、レーザーが使用不能になったため、これ以上進むことが出来なかった。

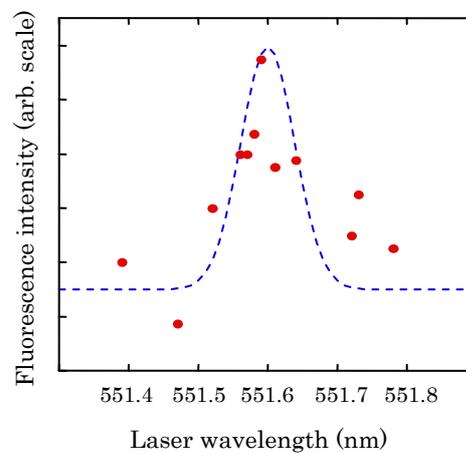


図4 オンライン・ガスセルで測定した安定同位体 ^{184}W の 551.6 nm 遷移の蛍光スペクトル

(3) 震災で使用不能になった波長可変レーザーを、本研究課題の終了間際に更新することができた。また、継続するテーマで科研費が認められた。今後の展開としては、これまでの結果を踏まえ、線幅の狭い波長可変レーザーをパルス化し、それらが OFF の時に蛍光を観測することによりレーザーの散乱光を抑えることを試みる。また、W 原子のどの遷移が測定に最適であるかを調べるため、候補となる幾つかの遷移をレーザー励起して最も蛍光強度が大きな遷移を選択する。さらに、ガスセルの内部セルを冷却してガス中の不純物を除き、W 原子がこれらと化学反応して失われてしまうのを防ぐ。これらの方法により測定条件の最適化を行って不安定核の測定に必要な感度を達成し、W 不安定核の核半径を測定する。

また、ここで開発される手法は W に限らず他の多くの不安定核に適用出来る。例えば、

アクチノイド元素は高融点であり、また非常に重い原子核では寿命も短く生成数も少ないので、この領域では同位体シフトや超微細構造が殆ど全く測定されていない。本研究で新たなレーザー分光手法が開発されれば、これらの核種の核半径の測定が可能となり、重核領域での核構造研究が大きく進展することが予想される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① H. Iimura, M. Koizumi, M. Miyabe, M. Oba, “Development of a gas cell for on-line laser spectroscopy of refractory elements”, JAEA-Review, 2011-040, 2011, pp.14-15, 査読無
<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2011-040.pdf>
- ② H. Iimura, M. Koizumi, M. Miyabe, M. Oba, I. Wakaida, “Development of laser spectroscopy for radioactive isotopes in the rhenium region”, JAEA-Review, 2010-056, 2010, pp.29-30, 査読無,
<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Review-2010-056.pdf>
- ③ M. Miyabe, M. Oba, H. Iimura, A. Akaoka, Y. Maruyama, I. Wakaida, “Spectroscopy of laser-produced plasma for remote isotope analysis of nuclear fuel”, Appl. Phys. **A101** (2010) 65-70, 査読有
DOI: 10.1007/s00339-010-5760-7
- ④ H. Iimura, F. Buchinger, “Charge radii in modern macroscopic-microscopic mass models: The role of dynamic quadrupole deformation”, Eur. Phys. J. **A42** (2009) 559-563, 査読有
DOI: 10.1140/epja/i2009-10789-2
- ⑤ A. Takamine, M. Wada, K. Okada, T. Nakamura, P. Schury, T. Sonoda, V. Lioubimov, H. Iimura (他 9 名), “Isotope shifts measurements of $^{7,9,11}\text{Be}^{+}$ ”, Eur. Phys. J. **A42** (2009) 369-373, 査読有
DOI: 10.1140/epja/i2009-10883-5
- ⑥ V. Liobimov, M. Wada, M. Ogawa, A. Takamine, P. Schury, H. Iimura (他 4 名) ” Precision fast ion-beam laser spectroscopy of Ar^{+} ”, Proc. 4th Int. Conf. on Laser Probing, AIP Conf. Proc.

1104, 2009, pp.42-46, 査読有
DOI: 10.1063/1.3115608

[学会発表] (計 2 件)

- ① M. Miyabe, M. Oba, H. Iimura, K. Akaoka, Y. Maruyama, H. Ohba, M. Tampo, I. Wakaida, “Remote isotope analysis for next generation nuclear fuel using resonant absorption spectroscopy”, 11th Int. Conf. on Laser Ablation, Nov. 14, 2011, Playa del Carmen, Mexico
- ② 飯村秀紀、大場弘規、大場正規、宮部昌文、若井田育夫、「アブレーションされた希土類原子の共鳴蛍光分光法の開発」、日本物理学会、2010年9月26日、大阪府立大学(堺市)

[その他]

ホームページ等

<http://nscience.jaea.go.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

飯村 秀紀 (IIMURA HIDEKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・研究主幹

研究者番号：10343906

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

小泉 光生 (KOIZUMI MITSUO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・研究副主幹

研究者番号：30354814

宮部 昌文 (MIYABE MASABUMI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・研究主幹

研究者番号：20354863

大場 正規 (OBA MASAKI)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・研究副主幹

研究者番号：60414588

和田 道治 (WADA MICHIHARU)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・チームリーダー

研究者番号：50240560